

Holzworth 방식에 따른 제주시의 대기 혼합고 산정

이 기 호 · 허 철 구

제주대학교 지구환경시스템공학부

The Estimation of Mixing Height by Holzworth Approach at Jeju City, Jeju Island

Ki-Ho Lee and Chul-Goo Hu

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea

Our previous study has indicated that the morning mixing heights are believed to be overestimated, so the application of an adjustment factor to account for the heat-island effects suggested by Holzworth to data obtained at Jeju region still contains uncertainties. Therefore, the efforts are made, more properly, to calculate the urban morning mixing heights of Jeju City. For this purpose, the mixing heights at Jeju City are estimated twice for each day of one-year records of upper air observation at Gosan and surface air observation at Jeju City, by using the Holzworth approach during one year from November 1997.

On the basis of urban-rural differences of minimum surface temperatures, it can be shown that the adjustment factor of 1°C instead of 5°C suggested by Holzworth is more reliable to account for the heat-island effects on Jeju region.

Key words : Jeju City, mixing height, Holzworth

서 론

대기 혼합고란 지표면의 오염원으로부터 배출되어 대기 중으로 배출되는 대기오염물질이 수직으로 이동할 수 있는 거리를 말한다. 이 대기 혼합고는 밤낮으로 달라지지만 계절에 따라서도 달라지고 지표 특성 및 지형에 의해서도 영향을 받게 된다. 그러므로 대기오염 물질의 분산은 이 층의 고유한 특성 및 그 높이에 따라 크게 영향을 받을 수밖에 없으므로 대기오염물질의 수직적 이동 거리가 제한되어 대기오염물질의 회석에 중요한 역할을 한다. 따라서 대기오염물질의 분산을 예측하기 위한 모델의 개발 및 운영에 필수적인 고려사항이기도 하다(Aron, 1983).

혼합고를 산정하는 데는 직접적인 방법과 간접적인 방법이 이용될 수 있다. 혼합고의 직접 측정은 비행기, 기구, 혹은 높은 탑에 난류 측정 센서를 부착하여 고도별 관측을 실시하여 난류가 현저하게 감소하는 위치까지를 혼합고로 정의하게 된다.

간접적인 산정 방법에는 최근에 원격 감시 Doppler SODAR를 이용하기도 하는데, 이는 바람, 난류 및 온도의 대기에서 수식 구조에 관해 연속적인 실시간 관측 자료를 제시하도록 설계된 장비인데, 혼합고의 산정이 비교적 정확하므로 점차 사용 빈도가 커지고 있다. 그러나 아직까지는 배경 신호음(background noise), 전기적 방해, 높이에의 제약(지상 약 1km 정도까지), 그리고 비싼 경비 문제 등의 극복해야 할 장애 요인이 남아 있다. 또 하나의 간접적인 방법으

로 1차원 적분 모델을 이용하는 방법이 있다. 이 모델들은 통상 미분 방정식으로 조합된 형태를 지니면서 역전의 높이(즉, 혼합고)와 역전의 강도를 시간의 함수로써 제공하게 된다. 이 모델은 통상 이른 아침에 이루어지는 수 km까지의 고층 관측에서 제공되는 초기 온도 분포는 물론이고 시간에 따른 지면 열 flux와 마찰 속도(friction velocity)에 관한 자료가 필요하게 된다. 이러한 적분 모델은 Tennekes(1977), Driedonke(1982), Paumier and Irwin(1991), 그리고 Lee(1986) 등이 발표한 바 있다. 이 중에서 가장 간단하면서도 가장 엄밀하게 검증된 모델은 수정 Carson model이라고 할 수 있으며 이는 Complex Terrain Dispersion Model 의 기상 전처리 프로그램으로 선정되어 있다(Perry et al., 1989). 그 외에도 역전에서 난류 유입에 대해 보다 정교하게 처리하는 등 여러 모델들도 제시되고 있다. 이 적분모델은 혼합고를 산정하는데 아주 유용한 도구이기는 하지만 혼합고 추정에 적분 모델을 적용함에는 지면 열 flux를 산정하기 위한 별도의 에너지 수지 모델이 필요하며, 최근에 개발된 에너지 수지 모델들에서는 우려할 만한 불확실성이 입증되기도 했다. 특히 도시지역이나 지면 상태가 불균일한 지역에서는 지면 특성을 모수화하는 어려움으로 인해 이러한 불확실성이 더욱 커지고 있다. 특히 육지와 해양의 성질을 동시에 가지는 해안가 또는 산림과 같이 지형이 비교적 복잡한 곳에서는 이러한 방법을 이용함에는 무리가 따르게 된다(김 등, 1997).

또 다른 간접 산정방법으로서 Holzworth 방법이 있다. 이 방법은 1972년 Holzworth가 제시한 이래로, 미국환경보호청에서 대기질 평가에 필요한 혼합고 산정에 있어서 표준방식으로 채택하고 있다. 특정 지역 내에서도 지표면의 열 flux와 온도는 대단히 불균일하기 때문에 지역 내 몇몇 지점에서 관측된 자료만을 이용하여 특정 지역의 대표적 혼합층 고도를 정확하게 산출하는 데는 많은 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 기후학적 관점에서 이러한 혼합고는 비록 절대적이지는 않겠지만 관심대상 지역에 대한 훌륭한 지표(indicator)로서 역할을 제공할 수 있다(Dobbins, 1979). Holzworth 방식에서는 일출 후 지표면의 태양에 의한 가열 그리고 아침 지표기온에 있어 도시와 농촌간의 차이에 관해 보정하기 위해 지표최저기온에

대해 5℃를 더해 준다. 물론 이 과정에 대해서는 12GMT가 지역마다 지방표준시로서는 차이가 있으며, 일출시간과 최대 교통량 발생 시간대 사이의 상관관계가 계절마다 차이가 있을 것이고, 모든 지역과 계절에 대해서 최저기온에 대한 단일 보정값을 부여하는 문제 등과 같은 수많은 반론이 제기될 수 있다. 그렇지만 현실적으로는 이런 과정을 보다 세련되게 해결할 수 있는 구체적인 정보는 없는 형편이다(Dobbins, 1979).

Holzworth의 연구 이래로 대기오염과 대기 혼합과의 관계를 파악하기 위한 많은 연구가 수행되었다(Holzworth, 1967, 1972; Aron, 1983; U.S. EPA, 1981, 1990). 그렇지만 우리나라의 경우 그 동안 고층 기상관측 자료의 가용성 문제로 인해 자료 이용에 어려움이 많아 혼합고 산정에 관한 연구가 극히 제한적이었다(이, 1990; 신, 1994; Chang et al., 1997; 최와 백, 1998). 따라서 대기 혼합고 자료에 관한 체계적 측정이나 분석이 매우 미비하여 대기오염 잠재성을 평가하거나 대기 분산 모델을 선정하고 이용함에 있어 많은 제약 요소가 되어 왔다(최와 백, 1998). 특히 우리나라는 산과 구름지, 평지 등이 혼할 뿐 아니라 해양으로 둘러싸여 있는 등 지표면 특성이 아주 다양함에도 불구하고 전국에서 고층기상관측이 단지 4곳에서만 이루어지고 있어 이를 이용하여 특정 지역에서의 혼합고를 평가함에는 각별한 주의가 필요하다. 특히 제주지역은 주변이 해양으로 둘러싸여 있어 대기 혼합층의 형성에 직·간접적인 영향을 미칠 것이므로, 제주지역에 관한 혼합고의 산정 및 적용에 실제적인 자료 제공을 위해 필요하다고 판단된다.

또한 앞선 연구(이 등, 2002) 에서 제주도 서부의 고산에서 관측된 고층기상자료에 의한 혼합고 산정은 도시의 열섬효과의 보정을 위해 Holzworth가 제시한 값으로는 타당성이 다소 떨어지는 것으로 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 제주도 서부지역에서 관측된 고층기상관측 자료를 이용하여 Holzworth 방식을 적용하여 실제 관측지점에 대략 40 km 정도 떨어진 도시 지역인 제주시의 대기 혼합고를 평가함과 아울러 도시 지역인 제주시에서의 혼합고 추정에 관한 타당성을 살펴보고자 했다.

연구방법

기상 관측 자료

우리나라의 고층기상을 관측하는 4곳 중의 한 곳인 제주고층 레이더 기상대는 동경 126°10', 북위 33°17', 해발 72 m에 위치하며 행정적으로는 제주도 남제주군 한경면 고산리의 바닷가에 위치하며 주변지역은 농경지로 이루어진 전형적인 농촌 지역에 해당된다. 이 곳에서는 지상기상과 고층기상을 동일한 위치에서 실시하고 있으며 고층 기상관측은 매일 2회 오전 9시(00GMT)와 오후 9시(12GMT)에 정기적으로 실시하고 있다. 고층기상 관측시에는 기압, 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속의 5가지 기상요소가 관측이 되고, 기압면의 고도 자료가 제공된다. 고층 기상 관측시 존대에서 발신되는 신호를 지상에서 매 10초 간격으로 수신하여 저장한다.

제주지역에서는 제주고층 레이더 기상대의에도 제주시에서도 매일 매시간 지상기상 관측을 실시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고산과 제주시에서 지상 관측한 기온, 습도 및 바람자료에 관한 매시간 자료를 활용하였다.

본 연구에서 수집된 1997년 11월부터 1년간 매일 2회씩 관측된 고층관측 자료 중 기기의 장애 및 보관 자료의 손실 등으로 인해 정상적인 10초 간격 관측 기록이 확보되지 못한 일수를 제외한 총 349일의 자료를 이용하였다. 기상관측 자료는 고층기상 관측자료가 정상적으로 확보된 날과 짝을 이룰 수 있도록 정리하여 사용하였다.

혼합고 산정방법

Holzworth가 기준으로 삼은 일출 직전의 고층기상 관측 시각으로서는 12GMT였지만 우리나라의 경우에는 일출 후 2~4 시간이 경과한 후인 09LST(00GMT)에 이루어진 관측된 자료를 이용하여 혼합고를 산정했다.

Holzworth방식을 보면 오전 혼합고(morning mixing height)는 02LST부터 06LST 사이에 관측된 지상 최저 기온에서 시작된 건조단열감률선과 관측된 수직온도 분포선과의 교점까지의 지상높이로서 계산된다.

오후 혼합고(afternoon mixing height)는 120LST에서 16LST사이에 관측된 지상최고 기온에서 시작된 건조단열감률선과 관측된 수직온도 분포선과의 교점까지의 지상 높이로서 선정된다.

그 외 혼합고 산정에 관한 자세한 내용은 이 등(2002)에 설명된 바와 동일하다.

결과 및 고찰

고도별 기상 개황

1997년 11월부터 1998년 10월까지 1년간 제주 고산에서 00GMT에 관측된 고층기상자료를 기상요소별로 고도 100 m 구간씩 평균하여 계절별로 Fig. 1에 나타냈다.

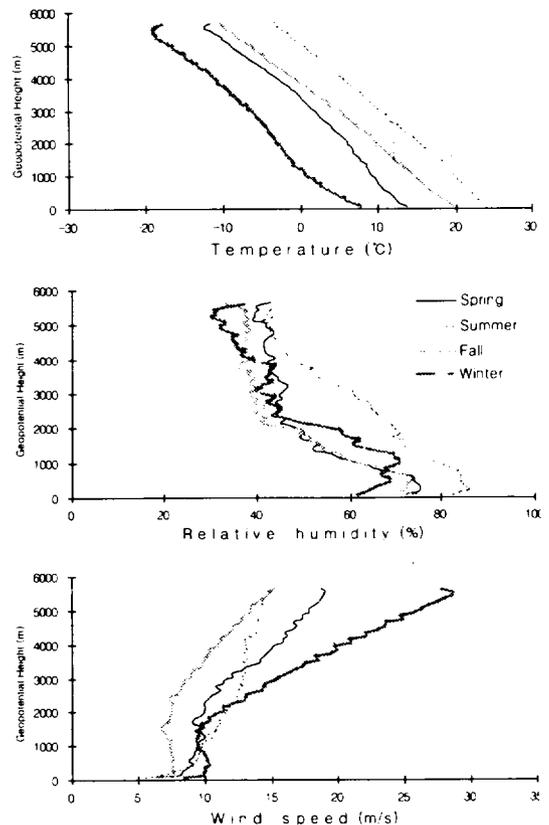


Fig. 1. Seasonal variation of temperature, relative humidity, and wind speed according to the geopotential height.

고도별 기온분포를 보면 상공으로 갈수록 기온은 낮아지는 일반적 형태를 보이지만 지구대기의 평균기온감률(0.65°C/100 m) 보다는 낮은 감률을 보였다. 그리고 고도별 기온분포를 계절별로 보면 겨울, 봄, 가을, 여름의 순으로 4계절의 특성이 뚜렷하게 나타났다.

상대습도는 전반적으로 고도 증가에 따라 낮아지는 일반적인 경향을 보였다. 여름철 고도별 상대 습도분포는 거의 일정한 비율로 감소하고 있으나, 다른 계절의 경우 고도 1000 m 부터 2500 m 부근에서 크게 감소하고 2500 m 이상에서는 대체로 일정한 경향을

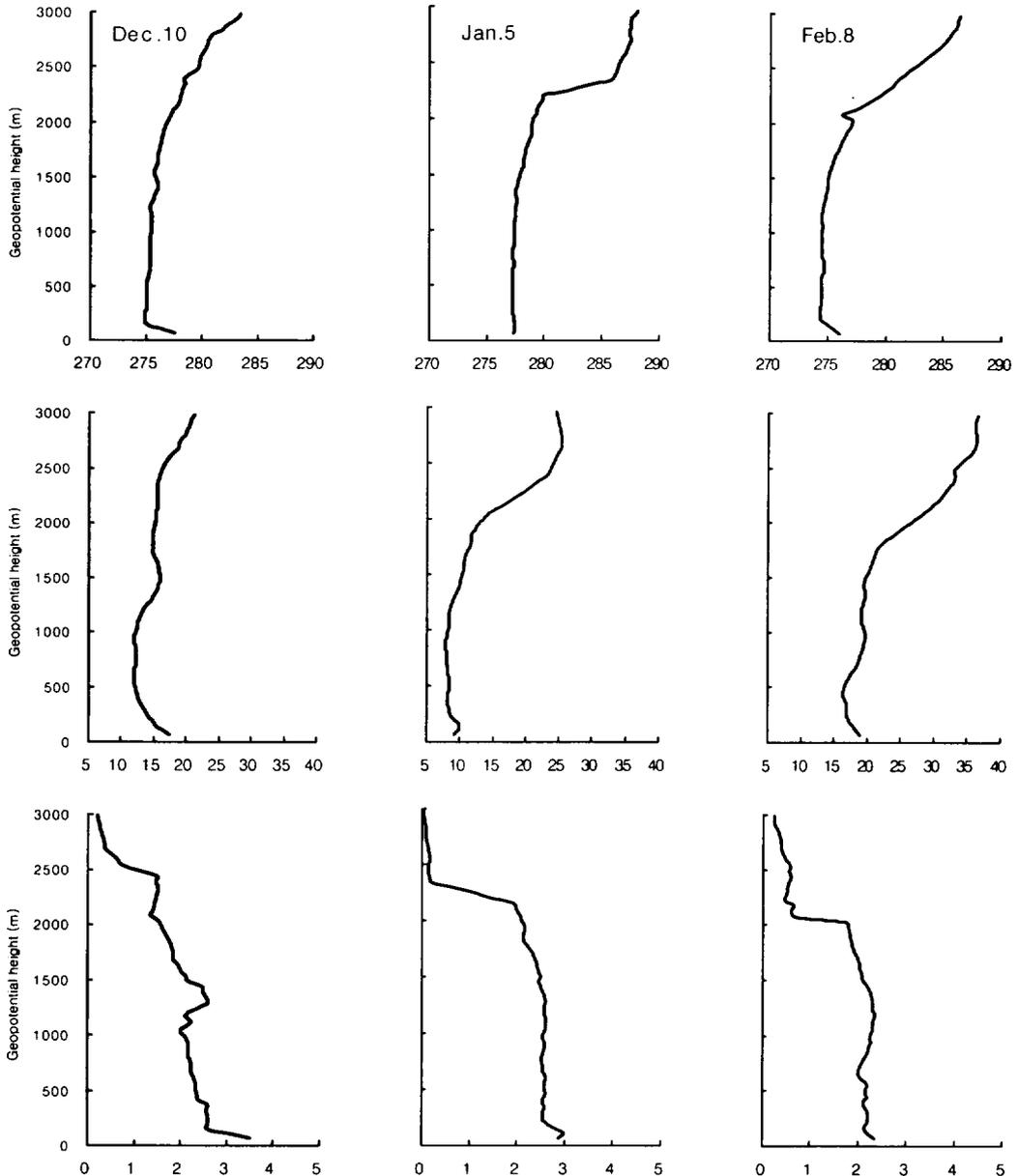


Fig. 2. Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are high.

보였다. 지상부근에서는 여름과 겨울철의 상대 습도는 큰 차이를 보이고 가을과 봄철은 비슷한 분포를 보였다. 이로써 보면 제주 지역은 여름철에 고온 다습하고 겨울철에 저온 건조해지는 기후를 보이는 특성을 이해 할 수가 있다.

풍속의 계절별 변화를 보면 지상 풍속은 여름철에 비해 겨울철이 훨씬 크고 봄과 가을은 비슷한 수준이면서 여름과 겨울철의 중간정도 수준을 보임을 알 수 있다. 그리고 지표에서 상부로 갈수록 풍속은 증가하는 경향을 보이지만 고도 2000 m 이하의 대기 하층

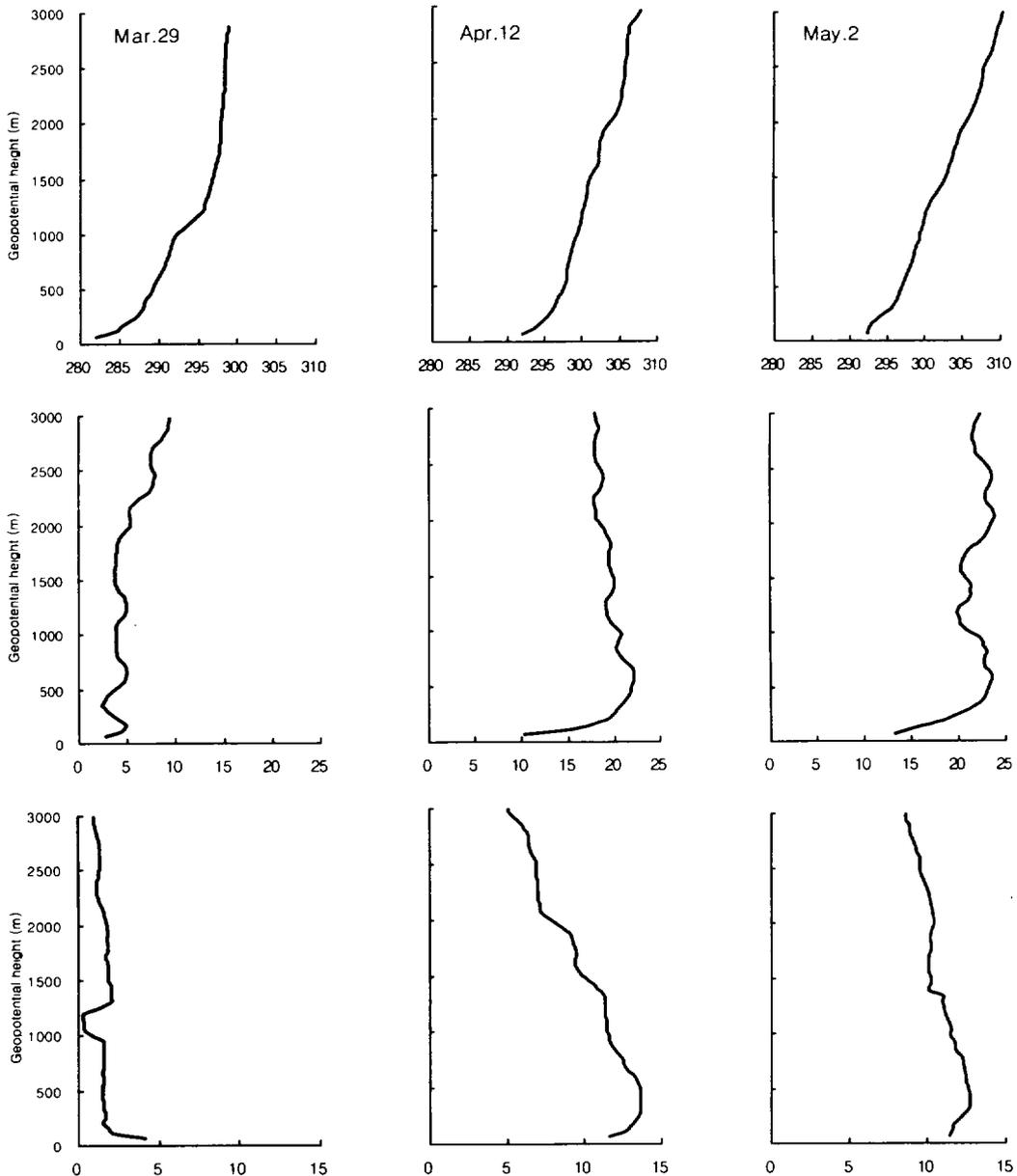


Fig. 3. Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are extremely low.

부를 보면 봄과 여름 그리고 가을과 겨울의 고도별 풍속 변화가 서로 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. 이 고도별 풍속 변화 형태를 토대로 볼 때 하루 대기층의 안정도는 봄과 여름철보다는 가을과 겨울철에 더욱 안정해지는 경향임을 알 수가 있다.

혼합층내 기상요소의 특성 분석

오전 및 오후 혼합고가 모두 2000 m 이상으로 높게 평가되는 경우(case H)와 오전 및 오후 혼합고가 출현하지 않거나 모두 낮게 평가되는 경우(case L)에 대해서 고도별 기상 요소에 대한 사례 분석을 실시하였다.

가. Case H

오전 및 오후 혼합고가 2000 m 이상 모두 높게 평가된 날의 고도별 온도, 풍속, 혼합비 분포를 Fig. 2에 나타냈다. 이런 경우는 겨울철이 대부분이고 지상에서 혼합고 (2100~2200 m 범위) 까지의 온도 변화가 거의 없고 그 이상의 고도에서 기온의 역전이 나타남을 알 수 있다. 이런 경우 고도별 풍속의 변화가 다른 날에 비해 비교적 작으며 온위의 고도별 변동과 비슷한 형태를 보인다. 그리고 혼합비 역시 혼합고까지 비교적 일정하게 유지되고 그 이상의 고도에서는 크게 감소하는 형태를 보임을 알 수가 있다. 이로써 보면 혼합층 내에서 상하의 혼합이 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

나. Case L

오전 및 오후 혼합고가 모두 아주 낮게 또는 산출되지 않는 것으로 평가된 날의 고도별 온도, 풍속, 혼합비 분포를 Fig. 3에 나타냈다. 이런 경우는 봄철이 대부분이 집중되고 있는데, 지표로부터 고도가 증가함에 따라 온위가 점진적으로 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이런 경우 고도별 풍속 분포를 보면 지표면 근처에서 고도별 풍속 변화가 심하게 나타날 뿐 아니라 전체 대기에서 고도별 풍속 변동이 심하게 나타남을 알 수 있다. 또한 혼합비의 고도별 변화를 보면 지면 근처에서는 고도별 혼합비 변화가 대체로 심하지만 전반적으로 고도 증가에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이처럼 오전 및 오후 혼합 고도가 전반적으로 낮을 경우는 대개 00GMT 전후에

질은 안개가 관측된 날이 대부분이었다. 안개 현상이 없는 경우(3월 29일)에는 지표 부근에서 혼합비는 고도 증가에 따라 급격히 감소함을 볼 수 있었다.

제주시 지역의 혼합고 산정

제주 지역에서 가장 도시화된 제주시 지역의 혼합고를 산정하기 위해 제주시 지역에서 관측된 지상기 온자료와 제주시 기상 관측소로부터 약 40 km 떨어진 제주 서부 시골 지역에 위치한 고산에서 00GMT에 관측된 고층기상관측 자료를 토대로 오전 및 오후 혼합고를 산정한 결과를 Fig. 4~Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 4는 제주시 지역의 지표 최고 기온과 고산에서 관측된 고층기상관측자료를 이용하여 오후 혼합고를 산정하여 월별로 나타낸 그림이다. 제주시 지역 혼합고는 11월, 12월, 1월 사이에 비교적 큰 변동을 보이며 1월에 최고값(1200 m)을 보인 후 점차 감소하여 5월에 최저값을 보이고, 다시 증가하여 8월에는 다시 정점(1100 m 수준)을 보인 후 다시 감소하고

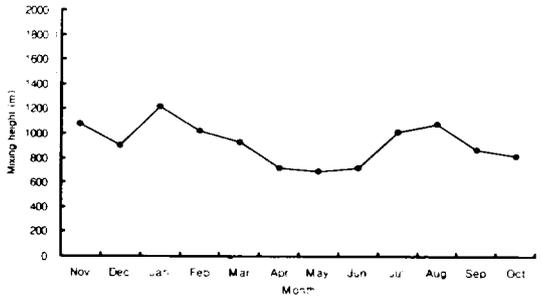


Fig. 4. Monthly variation of afternoon mixing height estimated at Jeju City.

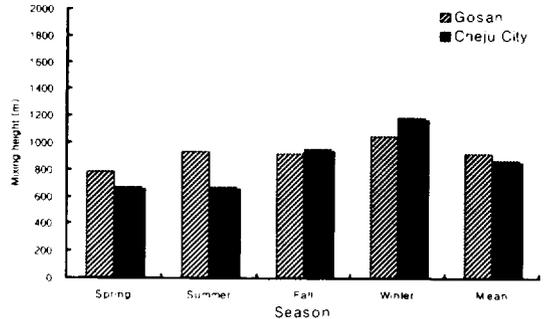


Fig. 5. Comparison of seasonal afternoon mixing heights between Jeju City and Gosan area.

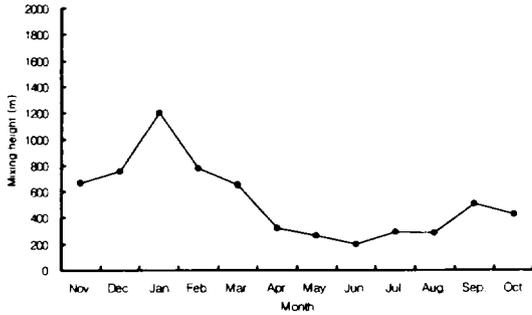


Fig. 6. Monthly variation of morning mixing height estimated at Jeju City.

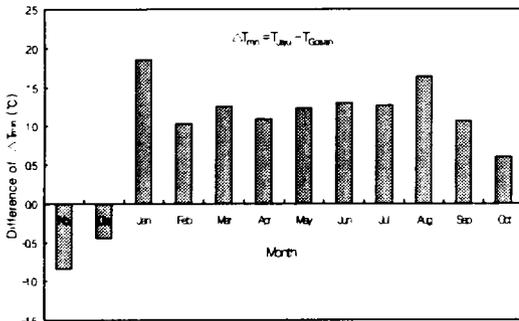


Fig. 7. Monthly difference of surface minimum temperatures between Jeju City and Gosan area.

늦가을부터 다시 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 계절별로 평균하여 고산지역 혼합고와 비교해 보면(Fig. 5 참고), 봄과 여름은 제주도 지역이 고산 지역보다는 다소 낮게 평가되고, 가을과 겨울에는 그 반대의 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그렇지만 연간으로 보면 이들 두 지역의 혼합고는 거의 같은 수준임을 알 수 있다.

Fig. 6은 제주지역에서 관측된 지표 최저기온자료를 이용하여 오전 혼합고를 산출한 결과를 월별로 나타낸 것이다. 여기서 오전 혼합고 산정시에는 지표 최저 기온에 5°C를 더하지 않았다. 그림에서 보면 11월에서 1월 사이에는 오전 혼합고가 큰 폭으로 증가하여 1월에 최고값을 보인 후 다시 큰 폭으로 감소하여 6월에 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였다. Holzworth(1972)는 고층기상관측이 교외 또는 시골지역에서 이루어지는 경우에 열섬의 영향을 고려하기 위해 지표최저기온에 5°C를 더해주는 방법을 제

시한 바 있다. 그렇지만 열섬의 효과는 지표면 특성이나 도시의 규모 등 여러 인자가 복잡하게 관련되어 있어 지역에 따라서 달리 적용할 필요가 있다(Chang et al., 1997). 따라서 본 연구에서는 우선 오전 혼합고 산정시 제주시와 고산지역에서 02~06LST 사이에 나타난 지표 최저 기온의 차이를 산출하여 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 두 지역에 최저 기온의 차이를 보면 11월과 12월에는 제주지역의 지표 최저 기온이 고산지역보다 낮은 것으로 나타났지만 그 외의 달에는 제주시의 최저 기온이 고산지역보다 평균 1°C 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 제주지역에서 도시와 시골지역 사이의 최저 기온은 1°C 정도의 차이를 보이는 것으로 판단하였다.

Table 1에는 열섬 효과를 고려하기 위한 온도 보정값을 달리하여 적용했을 때 각 경우에 따라 오전 혼합고가 산출되는 일수와 산출되지 못한 일수를 정리하여 나타냈다. 표에서 Case A는 제주지역에서 관측된 지표 최저 기온값을 보정없이 그대로 적용한 경우이고, Case B는 고산에서 관측된 지표 최저 기온값을 보정없이 적용한 경우, Case C는 고산에서의 지표 최저 기온에 1°C를 더한 경우, 끝으로 Case D는 고산에서의 지표 최저 기온에 Holzworth 방식을 따라 5°C를 더하여 적용한 경우이다. Table 1에서 보면 Case A와 Case C의 경우에는 Case B와 Case D와는 아주 다르게 혼합고 산정 일수와 산정 불가 일수가 거의 비슷하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 8에는 Case A와 Case C의 경우에 대해 산정된 오전 혼합고만을 기준으로 월별 평균하여 정리하였다. 산정된 월별 평균 오전 혼합고를 비교해 보면, 1월, 3월, 10월을 제외하고는 두 경우 모두 비슷한 혼

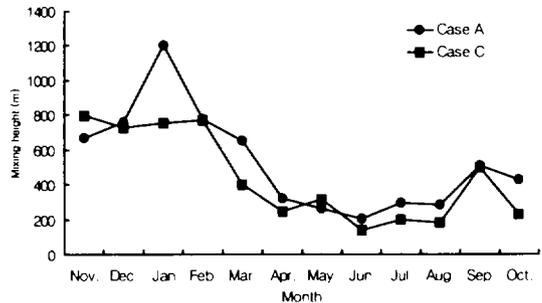


Fig. 8. Comparison of case A and case C shown in Table 1.

Table 1. Number of days with and without morning mixing height occurrence

Month	Days of each case							
	Case A		Case B		Case C		Case D	
	HT	M	HT	M	HT	M	HT	M
Nov.	9	19	8	20	14	14	28	0
Dec.	10	21	11	20	17	14	30	1
Jan.	14	16	0	30	9	21	29	1
Feb.	21	16	0	28	8	20	27	1
Mar.	11	19	0	30	9	21	29	1
Apr.	9	19	0	28	9	19	25	3
May.	5	25	0	30	3	27	25	5
Jun.	7	23	0	30	11	19	28	0
Jul.	13	18	3	28	19	12	31	0
Aug.	17	14	0	31	4	27	31	0
Sep.	4	25	0	29	6	23	28	1
Oct.	5	24	0	29	5	24	29	0

HT : Morning mixing height can be estimated

M : Morning mixing height can not be estimated

Case A : Application of T_{min} observed at Jeju City without temperature correction

Case B : Application of T_{mir} observed at Gosan without temperature correction

Case C : Application of $T_{min} + 1^{\circ}C$ using data observed at Gosan

Case D : Application of $T_{min} + 5^{\circ}C$ using data observed at Gosan

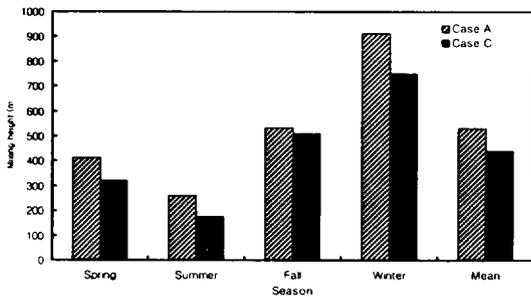


Fig. 9. Comparison of seasonal-averaged morning mixing heights for case A and case C shown in Table 1.

합고 수준을 보임을 알 수 있다. 이를 계절별로 보면 (Fig. 9 참고), 겨울철을 제외한 타 계절에는 거의 비슷한 수준을 보임을 알 수 있다. 겨울철에 오전 혼합고가 다소 큰 차이를 보이는 것은 해양의 역할과 제주도 지역의 인공열 방출 효과 등에 따른 도시와 시골간의 열 수지의 차이 때문으로 판단된다. 이런 결과로만 볼 때, 고산에서 관측한 고층 기상 자료를 이용하여 제주도 지역 오전 혼합고를 산정하고자 할 경우에 열섬 효과는 $1^{\circ}C$ 정도를 고려함이 바람직하다

고 판단되지만, 제주지역 열섬 효과 및 대기온도구조의 측정 시간대 등에 관한 보다 세심한 검토는 이루어져야 할 것이다.

결론

1997년 11월부터 1998년 10월까지 제주도 고산에서 관측된 고층기상관측자료와 지상관측자료, 제주시의 지상관측자료를 이용하여 Holzworth 방식에 준한 제주지역 혼합고를 산출하여 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제주도 지역에서는 오전 및 오후 혼합고가 2000 m 이상으로 높게 산정된 날은 주로 겨울철에 나타났으며, 이 경우 혼합고도 내에서 온위 및 풍속의 고도 변화가 작았고 혼합비 역시 거의 일정하게 유지되는 형태를 보이는데 주로 겨울철에 나타났다. 반면에 두 혼합고가 모두 아주 낮게 또는 산출하지 않는 날은 주로 봄철에 집중되어 있으며 고도별 온위는 점진적으로 증가되는 경향을 보였고 풍속은 고도별 변동이

비교적 심하였으며 혼합비는 고도에 따라 감소하는 경향을 보였다.

2. 도시지역인 제주시의 혼합고를 평가함에 있어서 시골지역에서 관측된 고층기상자료를 활용하고자 할 경우 열섬효과를 보정하기 위한 기온 보정값은 Holzworth가 제시한 값보다는 훨씬 낮은 1℃정도가 적절하다고 판단되나, 이에 대해서는 보다 종합적인 검토는 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김유근·문승의·안중배, 1997. 대기 혼합층 모사를 위한 1차원 수치모형: 득량만에서의 적용. 한국 환경과학회지, 6(5): 425-435.
- 이만근, 1990. 국내 대기혼합고의 지역별, 계절별 변화 추이에 관한 연구. 석사학위논문. 영남대학교, pp. 34.
- 신재현, 1994. 오산, 포항, 광주지역 일 최대혼합고 추정. 석사학위논문. 영남대학교, pp. 38.
- 이기호·강태진·박용이·허철구, 2002. 제주지역의 대기 혼합고도 추정에 관하여. 제주대해양과환경 논문집, 26: 109-117
- 최진수·백성욱, 1998. 오산, 포항, 광주지역 일 최대혼합고 추정. 한국대기보전학회지, 14(4): 379-385.
- Aron, R. 1983. Mixing height - an inconsistent indicator of potential air pollution concentrations. Atmos. Environ., 17: 2193-2197.
- Carson, D.J. 1973. The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer. Quart. J. R. Met. Soc., 99: 450-467.
- Chang, Y.S., Brown, D.F., Ghim, Y.S. 1997. Estimation of Mixing Heights Using the Holzworth Method in Korea. KAPRA., 13(5): 35-46.
- Dobbins, R.A. 1979. Atmospheric motion and air pollution. John Wiley & Sons, pp. 95-139, 283-293.
- Driedonks, A.G.M., 1982. Models and observations of the growth of the atmospheric boundary layer. Boundary Layer Meteorology, 23: 283-306.
- EPA. 1981. User's Manual for Mixing Height Computer Program. EPA-450/4-81-022. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, N.C.
- EPA. 1990. User's Guide for the urban air shed model. PB91-131227. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, N.C.
- Holzworth, G.C. 1967. Mixing Depths. in Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States. J. Appl. Meteorol., 6: 1039-1044.
- Holzworth, G.C. 1972. Mixing Heights. Wind Speeds and Potential Throughout the Contiguous United States. Office of Air Programs Pub. No. AP-101. Environment Protection Agency. Research Triangle Park, N.C.
- Lee, C.B. 1986. Simple model and climatological aspects of the structure of the convective boundary layer. Atmos. Environ., 20: 705-714.
- Paumier, J.O. and J.S. Irwin. 1991. Comparison of modified Carson and EPA mixing height estimates using data from five field experiment. Seventh Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with AWMA. New Orleans, 282-285.
- Perry, S.G., D.J. Burns, L.H. Adams, R.J. Paine, M.G. Dennis, M.T. Mills, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, and E.M. Insley, 1989. User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations(CTD MPLUS). Volume I: Model Descriptions and User Instructions. U.S. EPA, PA/600/8-89-041. Research Triangle Park, N.C.
- Tennekes, H. 1973. A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. J. Atmos. Sci., 30: 558-567.